

一维平板掺杂光子晶体的滤波特性

刘启能, 龙涛, 林睿, 张翠玲
(重庆工商大学计信学院, 重庆 400067)

摘要:利用电磁波在一维平板掺杂光子晶体中横向受限的条件,推导出电磁波在一维平板掺杂光子晶体中各个模式满足的关系式。研究了TE波和TM波各模式的缺陷模随模式量子数和杂质光学厚度的变化规律。利用缺陷模随模式量子数的变化规律可以实现多通道滤波,利用缺陷模随杂质光学厚度的变化规律可以实现调谐滤波。

关键词:平板光子晶体;受限;缺陷模;滤波

中图分类号:0436 **文献标识码:**A

Filtering feature of 1-D flat-panel doping photonic crystal

LIU Qi-neng, LONG Tao, LIN Rui, ZHANG Cui-ling

(Computer Science and Information Engineering College of Chongqing Technology and Business University, Chongqing 400067, China)

Abstract: The condition of electromagnetic wave mode is obtained by restrictions condition of electromagnetic wave in the 1-D flat-panel doping photonic crystal. Variety features of defect mode in TE wave and TM wave with mode quantum number and doping thickness are calculated. These features can be used to create multi-channel filter.

Key words: flat-panel photonic crystal; restrictions; defect mode; filter

1 引言

光子晶体的概念自1987年分别由S. John和E. Yablonovitch提出后,由于光子晶体在带隙方面的特殊性质,使它很快成为光学前沿领域中一个十分活跃的研究课题。近年来人们已对光子晶体开展了广泛、深入地研究^[1-8],但在这些研究中都把一维光子晶体作为横向非受限来处理,而真实的光子晶体是有一定外形,它的横向受到一定的外形限制,这种限制必然会影响到电磁波在其中的传输特性。因此,研究一维光子晶体的横向受限问题对弄清真实的一维光子晶体的特性有着十分重要的理论价值和实用价值。文献[9]对一维光子晶体横向受限的问题做了一些研究,取得了一些成果,但仍有许多重要问题有待深入研究。在一维光子晶体的诸多应用中,利用它研制优质滤波器是一个重要的应用^[10-12]。本文将对一种典型的一维横向受限掺杂光子晶体(一维平板掺杂光子晶体)的滤波特性进行研究。

由电磁波的传输理论可知,当一维光子晶体横向受限时,必然会引起在其中传输的电磁波出现多模性,这也必然引起其滤波性能的变化。因此,下面研究的内容对深入认识一维光子晶体的滤波性能以及对一维光子晶体滤波器的设计有重要意义。

2 模型和计算方法

一维平板掺杂光子晶体的结构如图1所示,沿z轴(对称轴)方向是由折射率为 $n_1 = 1.38$ (氟化镁)厚度为 d_1 和折射率为 $n_2 = 2.38$ (硫化锌)厚度为 d_2 的两种介质周期性地交替构成,中间掺了一层厚度为 d_3 折射率为 $n_3 = 2.97$ (氧化铝)的杂质,y轴垂直于纸面,平板的上下表面平行于yOz面,平板的厚度为h沿x轴方向。设该一维平板掺杂光子晶体的宽

基金项目:重庆市教委科技项目基金(No. KJ080720)资助。

作者简介:刘启能(1957-),男,教授,从事光学与原子分子物理研究。E-mail:liuqineng@yahoo.com.cn;ybxjwc@sina.com

收稿日期:2009-10-23;修订日期:2009-11-29

度远大于厚度,可以认为电磁波在该一维平板掺杂光子晶体中的 x 方向受限,而在 y 方向不受限。入射和出射空间的折射率为 n_0 。在后面的计算

中,两边的周期数取7,中心波长取 $\lambda_0 = 600 \text{ nm}$, $n_1 d_1 = n_2 d_2 = \lambda_0/4$,中心圆频率 $\omega_0 = 2\pi c/\lambda_0$,设归一化频率 $g = \omega/\omega_0$ 。

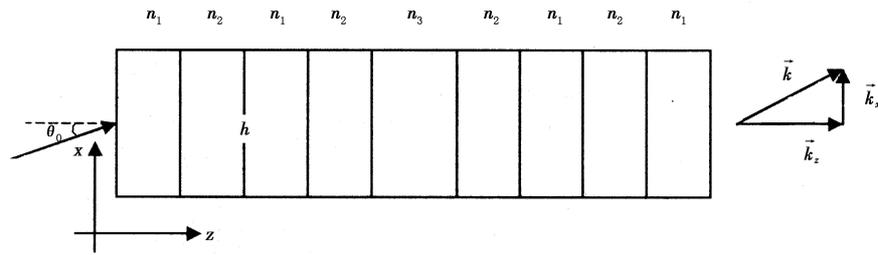


图1 一维平板掺杂光子晶体

Fig. 1 the flat-panel 1-D doping photonic crystal

由于电磁波在 x 方向受限,所以在该一维平板掺杂光子晶体中传播的电磁波其波矢 \vec{k} ($k = n\omega/2\pi c$, ω 为圆频率, c 为光速, n 为折射率) 的 x 分量 k_x 必须满足驻波条件:

$$k_x = \frac{n\omega}{2\pi c} \sin\theta = \frac{J}{2h} \quad J=0,1,2,3,\dots \quad (1)$$

J 取一个值,对应于电磁波的一个模式,故将 J 称为模式量子数。其中, $J=0$ 对应正入射, $J>0$ 对应斜入射。由式(1)可知,在一维平板掺杂光子晶体的传播的电磁波存在多个 k_x 分离的模式,这个特征是非受限一维光子晶体中没有的。式(1)也就是该平板掺杂光子晶体中电磁波的各模式满足的关系式。由于一维平板掺杂光子晶体中电磁波出现了多个 k_x 分离的模式,其缺陷模也会出现对应的模式特征,这就必然会引起滤波特性的变化。

由薄膜光学理论,电磁波在薄层介质 n_j 中的特征矩阵 M_j 为:

$$M_j = \begin{bmatrix} \cos\delta_j & -\frac{i}{p_j} \sin\delta_j \\ -ip_j \sin\delta_j & \cos\delta_j \end{bmatrix} \quad j=1,2,3 \quad (2)$$

$$\text{其中: } \delta_j = (2\pi/\lambda) n_j d_j \cos\theta_j \quad j=1,2,3 \quad (3)$$

$$p_j = \begin{cases} n_j \cos\theta_j & \text{TE 波} \\ \cos\theta_j/n_j & \text{TM 波} \end{cases} \quad j=1,2,3 \quad (4)$$

式(3)和式(4)中的 $\cos\theta_j$ 由式(1)给出。

一维平板掺杂光子晶体的整体特征矩阵 M 为:

$$M = \begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} \\ M_{21} & M_{22} \end{bmatrix} = (M_1 M_2)^N M_3 (M_2 M_1)^N \quad (5)$$

N 为周期数,一维平板掺杂光子晶体对电磁波的透射系数 t 为:

$$t = \frac{2n_0}{(M_{11} + M_{12}n_0)n_0 + (M_{21} + M_{22}n_0)} \quad (6)$$

其透射率 T 为:

$$T = |t|^2 \quad (7)$$

利用式(2)~式(7)可以研究该一维平板掺杂光子晶体的滤波特性。

3 模式的特征

首先由式(1)分析该平板掺杂光子晶体中电磁波各个模式的透射角 θ_0 与归一化频率 g 和平板厚度 h 的关系。令 $h = x\lambda_0$,由式(1)可得:

$$\sin\theta_0 = \frac{J}{2xg} \leq 1 \quad J=0,1,2,3,\dots \quad (8)$$

由式(8)可知,该平板掺杂光子晶体中电磁波各个模式有以下特征:

(1) 一维平板掺杂光子晶体中电磁波存在许多模式,每个模式由模式量子数 J 确定,而在一维非受限光子晶体中电磁波不存在模式。

(2) 当平板厚度一定时,模式量子数越大对应的透射角越大。同一模式的电磁波,平板厚度越大对应的透射角越小。透射角一定时,平板厚度越大对应的模式量子数越大。

(3) 透射波中出现一级禁带(频率最低的禁带)的缺陷模其模式量子数的取值范围也可由式(8)得到。一级禁带的缺陷模出现在 $g=1$ 附近,在式(8)中取 $g=1$ 就得出要获得一级禁带中的缺陷模其模式量子数和平板厚度($h=x\lambda_0$)必须满足的关系:

$$J \leq 2x \quad J=0,1,2,3,\dots \quad (9)$$

由式(9)可知,平板厚度越大对应的模式量子数的取值范围就越大。

4 滤波特性

利用一维平板掺杂光子晶体的缺陷模可以实现滤波^[10-12],下面通过研究缺陷模的特征来认识一维平板掺杂光子晶体的滤波特性。

4.1 滤波通道随模式量子数的变化

平板厚度固定为 $h=4\lambda_0$ ($x=4$), $n_3 d_3 = \lambda_0/2$ 。由式(3)可知,模式量子数的取值范围为 $J \leq 8$ 。计

算出 TE 波的前三个模式 ($J=0,1,2$) 的透射率 T 随归一化频率 g 的响应曲线和透射率 T 随透射角 θ_0 的响应曲线,如图 2 和图 3 所示。计算出 TM 波的前三个模式 ($J=0,1,2$) 的透射率 T 随归一化频率 g 的响应曲线和透射率 T 随透射角 θ_0 的响应曲线,如图 4 和图 5 所示。由图 2~图 5 可知:

(1) 对于 TE 波和 TM 波,模式量子数 $J=0,1,2$ 时,在禁带的中间都分别出现了一个缺陷模。这表明 TE 波和 TM 波的各个模式都会出现缺陷模,这每一个缺陷模都可以作为一个滤波通道。

(2) 对于 TE 波, $J=0,1,2$ 三个滤波通道的频率中心分别为 $g = 1.00, 1.0025, 1.008$; 对于 TM 波, $J=0,1,2$ 三个滤波通道的频率中心分别为 $g = 1.00, 1.0025, 1.009$ 。

(3) 对于 TE 波和 TM 波, $J=0,1,2$ 三个滤波通道的频率半高宽 (FWHM) 几乎都相等,都为 $\Delta g = 0.0006$ 。

(4) 对于 TE 波和 TM 波, $J=0,1,2$ 三个滤波通道对应的透射角都分别在 $\theta_0 = 0 \text{ rad}, \theta_0 = 0.125 \text{ rad}, \theta_0 = 0.250 \text{ rad}$ 处。

利用上述特性,在透射空间 $\theta_0 = 0 \text{ rad}, \theta_0 = 0.125 \text{ rad}, \theta_0 = 0.250 \text{ rad}$ 三个方向上分别可以获得归一化频率为 $g = 1.00, 1.0025, 1.008$, 归一化频率半高宽 FWHM 为 $\Delta g = 0.0006$ 的电磁波,这样就实现多通道滤波的目的。

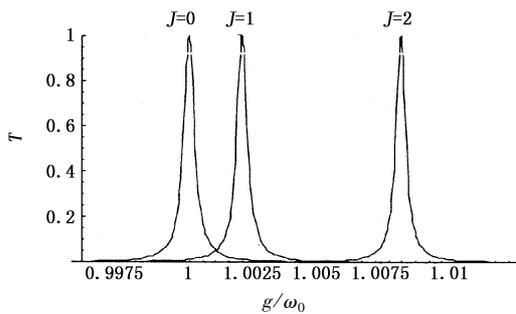


图 2 透射率随 g 的响应曲线 (TE 波)

Fig. 2 response curves of the transmissivity versus g (TE wave)

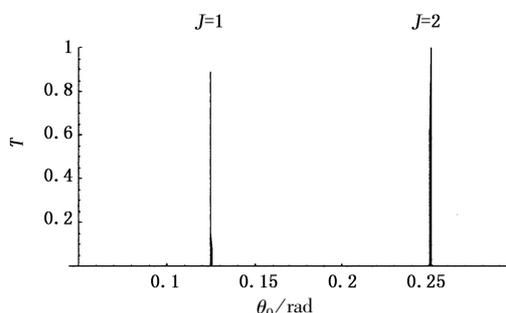


图 3 缺陷模随 θ_0 的响应曲线 (TE 波)

Fig. 3 response curves of the defect mode versus θ_0 (TE wave)

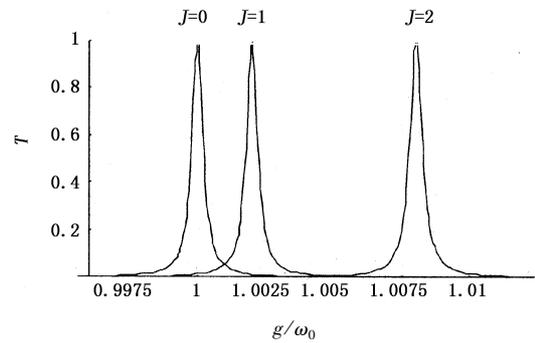


图 4 透射率随 g 的响应曲线 (TM 波)

Fig. 4 response curves of the transmissivity versus g (TM wave)

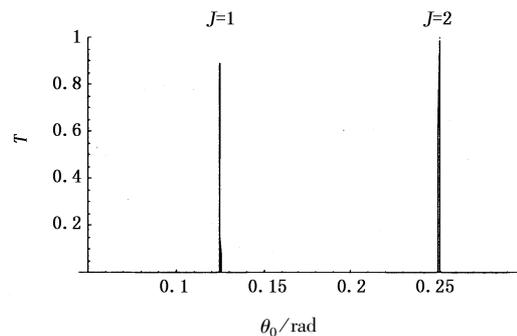


图 5 缺陷模随 θ_0 的响应曲线 (TM 波)

Fig. 5 response curves of the defect mode versus θ_0 (TM wave)

4.2 滤波通道随杂质光学厚度的变化

平板厚度固定为 $h = 4\lambda_0$, 计算出 TE 波和 TM 波的模式量子数 $J=1$ 的缺陷模随杂质的光学厚度 $n_3 d_3$ 和归一化频率 g 变化的立体图,如图 6 所示

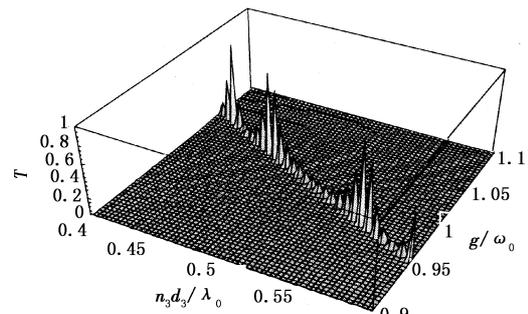


图 6 透射率随 $n_3 d_3$ 和 g 变化的立体图

Fig. 6 3D curves of the transmissivity versus $n_3 d_3$ and g

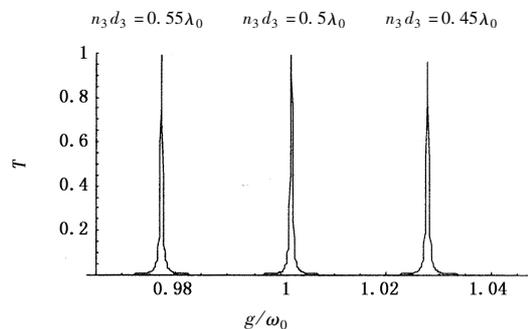


图 7 缺陷模随 g 的响应曲线

Fig. 7 response curves of the defect mode versus g

(TE波和TM波的图几乎没有区别)。为了更清楚地观察滤波通道随杂质光学厚度的变化,计算出取 $n_3d_3 = 0.45\lambda_0, 0.5\lambda_0, 0.55\lambda_0$ 时其缺陷模随归一化频率 g 的响应曲线如图7所示。由图6和图7可知:

(1)对于TE波和对于TM波, $J=1$ 的滤波通道的频率中心都随杂质光学厚度增加近似成线性减小。当 $n_3d_3 = 0.45\lambda_0, 0.5\lambda_0, 0.55\lambda_0$ 时其滤波通道的频率中心分别为 $g = 1.028, 1.003, 0.977$ 。

(2)对于TE波和对于TM波,当 $n_3d_3 = 0.45\lambda_0, 0.5\lambda_0, 0.55\lambda_0$ 时其滤波通道的频率半高宽都不变。

利用上述特性,可以通过改变杂质的光学厚度来实现调谐滤波的目的。

5 结论

本文利用电磁波在一维平板掺杂光子晶体中横向受限的条件,推导出电磁波在一维平板掺杂光子晶体中各个模式满足的关系式。利用这个关系式并结合特征矩阵法研究了TE波和TM波各模式的缺陷模随模式量子数和杂质光学厚度的变化规律。利用缺陷模随模式量子数的变化规律可以实现多通道滤波,利用缺陷模随杂质光学厚度的变化规律可以实现调谐滤波。

参考文献:

- [1] Chen W Z, Shen Y, Hu M L, et al. Structure of basic period of one-dimensional photonic crystal and the characters of forbidden bands [J]. Acta Photonica Sinica, 2001, 30(12): 1453-1456. (in Chinese)
陈慰宗, 申影, 忽满利, 等. 一维光子晶体的基本周期结构及其禁带特征 [J]. 光子学报, 2001, 30(12): 1453-1456.
- [2] Duan X F, Niu Y X, Zhang C, et al. Light propagation characteristics of 1-D photonic crystal [J]. Acta Photonica Sinica, 2003, 32(9): 1086-1089. (in Chinese)
段晓峰, 牛燕雄, 张维, 等. 一维光子晶体的光学传输特性分析 [J]. 光子学报, 2003, 32(9): 1086-1089.
- [3] Fang Yun-tuan, Shen Ting-gen, Tan Xi-lin. Study on One dimensional photonic crystal with impurity defect [J]. Acta Photonica Sinica, 2004, 33(11): 1557-1560. (in Chinese)
方云团, 沈廷根, 谭锡林. 一维光子晶体掺杂缺陷模研究 [J]. 光学学报, 2004, 33(11): 1557-1560.
- [4] Zhou Jingou, Du Guiqiang, Zhang Yawen. Electromagnetic modes of thickness-modulated dual-periodic one-dimensional photonic crystals [J]. Acta Physica Sin, 2005, 54(8): 3703-3707. (in Chinese)
周金苟, 杜桂强, 张亚文. 双周期厚度调制的一维光子晶体的电磁模 [J]. 物理学报, 2005, 54(8): 3703-3707.
- [5] Du Guiqiang, Liu Nianhua. Optical transmission spectra of one dimensional photonic crystals with a mirror symmetry [J]. Acta Physica Sin, 2004, 53(4): 1095-1097. (in Chinese)
杜桂强, 刘念华. 具有镜像对称结构的一维光子晶体的透射谱 [J]. 物理学报, 2004, 53(4): 1095-1097.
- [6] Zhang Dengguo, Ni Na, An Henan. Electromagnetic field analysis and numerical calculation of one-dimensional Magneto-photonic crystal [J]. Acta Photonica Sinica, 2004, 33(8): 1007-1010. (in Chinese)
张登国, 倪娜, 安鹤南. 一维磁性光子晶体的电磁场分析和数值计算 [J]. 光子学报, 2004, 33(8): 1007-1010.
- [7] Liu Qi-neng. Effect of impurity absorption on one-dimensional photonic crystal defect mode [J]. Chinese Journal of Lasers, 2007, 34(6): 777-780. (in Chinese)
刘启能. 杂质吸收对一维光子晶体缺陷模的影响 [J]. 中国激光, 2007, 34(6): 777-780.
- [8] Li Rong, Ren Kun, Ren Xiao-Bin. Angular and wavelength selectivity of band gaps of holographic photonic crystals for different polarizations [J]. Acta Physica Sin, 2004, 53(08): 2520-2523. (in Chinese)
李蓉, 任坤, 任晓斌. 一维光子晶体带隙结构对不同偏振态的角度和波长响应. [J]. 物理学报, 2004, 53(08): 2520-2523.
- [9] Song Yu-ling, Wang Xuan-zhang. Properties of a one-dimensional confined antiferromagnetic photonic crystal [J]. Acta Photonica Sinica, 2008, 37(12): 2404-2407. (in Chinese)
宋玉玲, 王选章. 一维受限反铁磁光子晶体能带的性质 [J]. 光学学报, 2008, 37(12): 2404-2407.
- [10] Liu Qi-neng. Theoretical study of multi-channel polarization tunable filter of photonic crystal [J]. Acta Photonica Sinica, 2008, 37(2): 305-308. (in Chinese)
刘启能. 光子晶体多通道可调谐偏振滤波器的理论研究 [J]. 光子学报, 2008, 37(2): 305-308.
- [11] Liu Qi-neng. Theoretic study of a novel kind of tunable filter based on 1-D photonic crystal [J]. Journal of Optoelectronics · Laser, 2007, 18(5): 574-577. (in Chinese)
刘启能. 一种新型可调谐光子晶体滤波器的理论研究 [J]. 光电子·激光, 2007, 18(5): 574-577.
- [12] Liu Qi-neng. An effect of absorption of dopant on design of photonic crystal filters [J]. Laser Technology, 2008, 32(3): 327-330. (in Chinese)
刘启能. 杂质吸收对光子晶体滤波器设计的影响 [J]. 激光技术, 2008, 32(3): 327-330.